

平成 23 年度福井大学研究育成経費「若手研究者による今後の進展が期待できる研究」

金属表面プラズモンによる電磁波の超集束効果を用いた、 微量液体測定用テラヘルツ波プローブの研究開発

研究代表者： 山本 晃司（遠赤外領域開発研究センター・准教授）

共同研究者： 谷 正彦（遠赤外領域開発研究センター・教授）

概 要	
	金属 V 溝結合平行平板導波路を作成し、テラヘルツ波超集束効果の検証と、微量液体測定への応用可能性を調べた。金属 V 溝結合平行平板導波路を用いることで回折限界波長以下の開口幅でもテラヘルツ波が透過することを確認し、テラヘルツ波が超集束することを実証した。テラヘルツ波の微量液体測定への応用可能性に対して、プラスチックチューブを金属 V 溝結合平行平板導波路で挟み、微量液体として超純水を移送しながらテラヘルツ測定を行った。その結果、チューブの外径や内径および形状に依存する応答が観測されたほか、超純水自身の吸収に関して 6 倍の高感度測定が可能であることが明らかになった。この結果、金属 V 溝結合平行平板導波路を用いることで、テラヘルツ波による微量液体検査応用への可能性が示された。
関連キーワード	金属 V 溝結合平行平板導波路、テラヘルツ、超集束効果、表面プラズモン、微量液体検査

研究の背景および目的

可視・赤外光で不透明な対象物に対しても、テラヘルツ波を利用することで非接触・非破壊で内部スペクトル検査が可能となることがこれまでに明らかにされてきた。一方、テラヘルツ波による液体、特に水を含む溶液の検査応用の研究例は少ない。この主な原因は、回折限界によってテラヘルツ波を微小な空間に集めることが困難であることである。つまり、自由空間を伝搬するテラヘルツ波は、サブミリメートル以下に集光することができない。そのため、従来のテラヘルツ時間領域分光測定では、数ミリメートルまたはそれ以上の直径を有する試料を準備する必要があった。波長よりも狭い幅にテラヘルツ波を集めること（超集束効果）ができれば、薄膜や微量サイズの試料に対するテラヘルツ時間領域測定可能となる。これ

までに、われわれは、金属 V 溝導波路の開口角が広い場合（開口角： 10° ）でもテラヘルツ波は効率よく超集束することを実験的に明らかにし、開口幅 $20\ \mu\text{m}$ の金属 V 溝導波路をテラヘルツ波が振幅比で 20%程度透過することを報告した。しかし、金属 V 溝導波路では、微小試料の配置など、テラヘルツ時間領域分光法へ応用する上で問題となる点が多い。そこで、本研究では、水を含む溶液に対してテラヘルツ波による検査応用研究を推進することを目的とした。具体的には、液体をチューブで移送した状態で、簡便にテラヘルツ波検査を行うことが可能となる、微量液体検査用のテラヘルツ波プローブの開発を目指すための基礎実験を行い、プローブの特性を明らかにした。

研究の内容および成果

本研究では、「微量液体検査用のテラヘルツ波プローブの開発」における問題点を克服するため、金属プラズモンによるテラヘルツ波の超集束効果を利用することによって、微量液体試料用テラヘルツ波プローブの開発を目指し、以下の目標に取り組んだ。

- [1] 金属 V 溝構造テラヘルツ波プローブの最適化
- [2] 微量液体循環システムと金属 V 溝構造テラヘルツ波プローブのカップリング最適化

測定は、テラヘルツ時間領域分光装置（Pulse IRS-1000, 先端赤外）を用い、テラヘルツ波の集光位置に金属 V 溝結合平行平板導波路を挿入し、金属 V 溝側からテラヘルツ波を入射して透過測定を行った。金属ブロックを平行移動させて金属平行

平板間の間隔を変えて測定することで、テラヘルツ波の透過に対する平行平板間隔依存性を調べた。課題[1]に対して金属 V 溝結合平行平板導波路（図 1）を作成した。

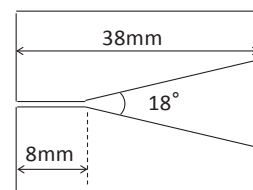


図 1. 金属 V 溝結合平行平板導波路の構造。金属は、アルミを使用。

この金属 V 溝結合平行平板導波路に対して、テラヘルツ波の透過特性を測定し、金属 V 溝結合平行平板導波路における超集束効果を調べた。

金属 V 溝結合平行平板導波路に対して、入射テラヘルツ波の偏光を金属平行平板と垂直にしたときのテラヘルツ波透過波形を図 2 に示す。金属平行平板間の間隔は $21\ \mu\text{m}$ である。図 2 では、20% 程度の振幅のテラヘルツ波が、波長よりも 1 桁程度狭い金属 V 溝結合平行平板導波路を透過している。このことから、金属 V 溝と金属平行平板の結合面において、金属 V 溝で超集束したテラヘルツ波が、効率よく金属平行平板に伝送されることが明らかになった。

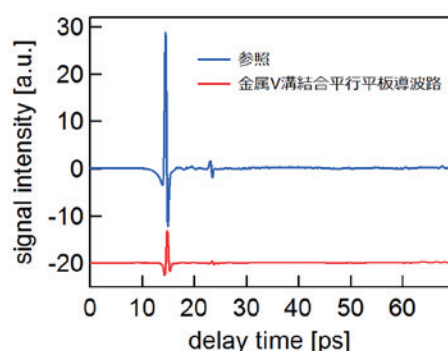


図 2. 金属 V 溝結合平行平板導波路を透過したテラヘルツ波パルス（下線）と、参照テラヘルツ波パルス（上線）。金属平行平板間の間隔： $21\ \mu\text{m}$ 。テラヘルツ波の偏光方向は、金属平行平板に垂直。

次に、金属 V 溝結合平行平板導波路の金属平行平板間にプラスチックチューブ（PEEK®チューブ、外径：1/16 インチ）を挿入し、液体クロマトポンプを用いてチューブ内に液体を流して微量液体のテラヘルツ波透過測定を行った結果を図 3 に示す。

金属 V 溝結合平行平板導波路のみを透過した場合と比較して、チューブを透過することでテラヘルツ波のスペクトルが連続的に減衰するとともに、 $10\ \text{cm}^{-1}$ および $20\ \text{cm}^{-1}$ 付近に線幅の細い減衰が見られる。チューブに超純水を流すと、連続的なスペクトルの減衰と比較して、線幅の細い減衰はより顕著になる。一方、水のテラヘルツ領域の吸収スペクトルには、このような線幅の狭い吸収線は存在しない。つまり、 $10\ \text{cm}^{-1}$ および $20\ \text{cm}^{-1}$ 付近の線幅の細い減衰を測定することによって、水溶液系の高感度検出の可能性が示唆された。

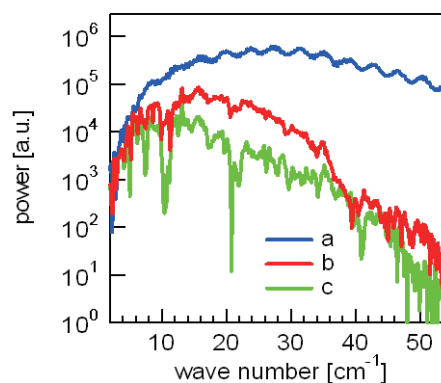


図 3. 透過テラヘルツ波のパワースペクトル。
a: 金属 V 溝結合平行平板導波路、b: 金属 V 溝結合平行平板導波路+PEEK®チューブ、c: 金属 V 溝結合平行平板導波路+PEEK®チューブ+超純水

まとめとして、本研究において、金属 V 溝結合平行平板導波路を作成し、テラヘルツ波超集束効果の実験的検証と、微量液体測定への応用可能性を示すことに成功した。

本助成による主な発表論文等、特記事項および競争的資金・研究助成への申請・獲得状況

「原著論文」

1. Masahiko Tani, Kohji Yamamoto, et al., "Photoconductive Emission and Detection of Terahertz Pulsed Radiation Using Semiconductors and Semiconductor Devices," In a special issue of Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Vol.31, No. 5 (2012)
(他 2 件)

「学会発表」

1. 山本晃司、他 7 名、「金属 V 溝結合平行平板導波路のテラヘルツ透過特性」(17p-E8-3)、春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012.3.15-18、早稲田

(他 66 件（国際学会、国内学会を含む）)

「競争的資金・研究助成への申請・獲得状況」

1. 2012 年度～2013 年度、「金属表面プラズモンによる電磁波の超集束効果を用いた、微量液体測定用テラヘルツ波プローブの研究開発」、公益財団法人東電記念財団平成 23 年度研究助成（電気・エネルギー一般研究）、1,000 千円／2 年
2. 2011 年度、「金属表面プラズモンによる電磁波の超集束効果を用いた、微量液体測定用テラヘルツ波プローブの研究開発」、中部科学技術センター学術奨励研究助成事業、300 千円／1 年